

Metodología para el Desarrollo de una Célula de Manufactura Aditiva Robótica basada en el Sistema de Deposición de Metal por Láser (LMD)

Brayan S. Figueroa¹, Alberto Alvares²

¹ Grupo de Inovação em Automação Industrial - GIAI, Departamento de Engenharia Mecânica y Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasil. Email: brayan.s.figueroa47@gmail.com

² Grupo de Inovação em Automação Industrial - GIAI, Departamento de Engenharia Mecânica y Mecatrônica, Universidade de Brasília, País. Email: albertoalvares@alvarestech.com

Resumen

Este trabajo propone una metodología para el desarrollo una célula de manufactura aditiva robótica con deposición de metal por láser con alambre (LMD-wire). Se integra un robot KUKA KR70 R2100 con un cabezal de impresión de metal Meltio Engine LMD, y se desarrolla un sistema CAD/CAPP/CAM basado en un DT (Digital Twin) conforme a la norma ISO 23247. El modelo CAD modela piezas en 3D, utilizado en el modelo CAPP para planificar estrategias de corte adaptadas, generando código Kuka KRL en Rhino/Grasshopper y Meltio Space. Este código se envía al modelo CAM, compuesto por un DT de la célula física para simulación realista y supervisión de datos en tiempo real, conectando el mundo físico con el digital. Después de la validación del código, se imprime la pieza 3D en metal, ilustrada con un caso de estudio de una pieza planar impresa con diferentes parámetros de deposición.

Palabras clave: Manufactura Aditiva, LMD, Robótica, Digital Twin.

Abstract

This work proposes a methodology for developing a robotic additive manufacturing cell with laser metal deposition using wire (LMD-wire). It integrates a KUKA KR70 R2100 robot with a Meltio Engine LMD metal printing head and develops a CAD/CAPP/CAM system based on a Digital Twin (DT) in accordance with ISO 23247 standards. The CAD model creates 3D pieces, which are used in the CAPP model to plan adapted cutting strategies, generating KUKA KRL code in Rhino/Grasshopper and Meltio Space. This code is sent to the CAM model, which comprises a DT of the physical cell for realistic simulation and real-time data monitoring, linking the physical world with the digital one. After validating the code, the 3D metal piece is printed, illustrated with a case study of a planar piece printed with different deposition parameters.

Keywords: Additive Manufacturing, LMD, Robotics, Digital Twin.

1. Introducción

La fabricación aditiva ha transformado radicalmente los métodos tradicionales de manufactura al permitir la creación de objetos tridimensionales mediante la adición controlada de material, capa por capa, a partir de modelos digitales. Este avance tecnológico ha ganado una prominencia significativa en sectores como la industria aeroespacial, automotriz, médica y de bienes de consumo debido a sus capacidades únicas de personalización extrema, alta precisión geométrica y reducción sustancial de costos operativos y tiempos de producción [1-4].

Dentro del panorama de la fabricación aditiva avanzada, la técnica de Deposición de Metal por Láser con alambre (LMD-wire) emerge como una solución altamente eficiente para la producción de componentes metálicos de alta resistencia y precisión [5-7]. Este método utiliza un láser de alta potencia para fundir alambre de metal, el cual se deposita de manera controlada sobre sustratos previamente conformados. La deposición precisa y estratégica permite la fabricación de geometrías complejas y adaptativas, optimizando el uso de material y minimizando los residuos generados durante el proceso [8-9].

Ante este contexto de avances tecnológicos, los Gemelos Digitales (Digital Twin, DT) representan una innovación crucial en la optimización y control de los procesos de fabricación aditiva [10-11]. Estos modelos virtuales precisos replican fielmente el comportamiento de sistemas físicos en tiempo real, integrando datos en tiempo real provenientes de sensores y otras fuentes para simular su comportamiento y rendimiento bajo diversas condiciones operativas [12-13].

En el ámbito de la fabricación aditiva con LMD-wire, los DT permiten una simulación detallada de la interacción de parámetros críticos como la velocidad de deposición, la energía del láser y la distribución del material, facilitando así la predicción y mitigación proactiva de posibles defectos de fabricación [14]. Esta capacidad no solo mejora la calidad y consistencia de las piezas producidas, sino que también optimiza los tiempos de producción y reduce los costos asociados.

La integración estratégica de Gemelos Digitales en la fabricación aditiva abre nuevas fronteras para la innovación y eficiencia en la producción industrial, ofreciendo un camino hacia la mejora continua y la optimización de procesos en sectores clave como la fabricación de componentes funcionales y estructurales.

En el marco de estos avances, la integración de la tecnología de Deposición de Metal por Láser con alambre (LMD-wire) en células de manufactura aditiva representa un avance significativo hacia la producción eficiente de componentes metálicos avanzados. Este método aprovecha las ventajas de la fabricación aditiva para crear geometrías complejas con alta precisión y resistencia, optimizando el uso de material y reduciendo los residuos. La incorporación de DT en estas células permite una simulación precisa del proceso de deposición en tiempo real y ajustes proactivos de parámetros críticos, mejorando así la calidad y eficiencia del proceso [15-16].

Este trabajo presenta una propuesta metodológica para el desarrollo de una célula de manufactura aditiva robótica con deposición de metal por láser utilizando alambre (LMD-wire), integrada con un sistema CAD/CAPP/CAM para manufactura aditiva basado en un DT. Esta metodología detalla los módulos del sistema y describe su interacción, representados mediante diagramas IDEF0.

La arquitectura propuesta para el desarrollo de la célula de manufactura aditiva robótica con deposición de metal por láser utilizando alambre (LMD-wire) se fundamenta en la integración física y lógica de sus componentes. La metodología CAD/CAPP/CAM se concibe a partir de la integración de las actividades de diseño (CAD), planificación del proceso (CAPP) y manufactura (CAM), basadas en un DT conforme al estándar ISO 23247.

2. Metodología

La célula de manufactura aditiva robotizada, basada en el proceso de deposición de metal con alambre, fue modelada utilizando una metodología fundamentada en el modelo IDEF0. En primer lugar, se presentan los diagramas que detallan las actividades de integración física y lógica, así como el montaje físico de los componentes de la célula. Además, se aborda la integración física y lógica entre estos componentes y el sistema de control.

Esta metodología cubre desde la integración física de los componentes hasta la integración lógica, el diseño, la planificación y la manufactura de la pieza impresa, proporcionando un enfoque completo para el desarrollo de la célula de manufactura aditiva. Finalmente, se exponen los diagramas correspondientes a las actividades de desarrollo e implementación del sistema CAD/CAPP/CAM basado en un Gemelo Digital, enfocado en la impresión de piezas metálicas.

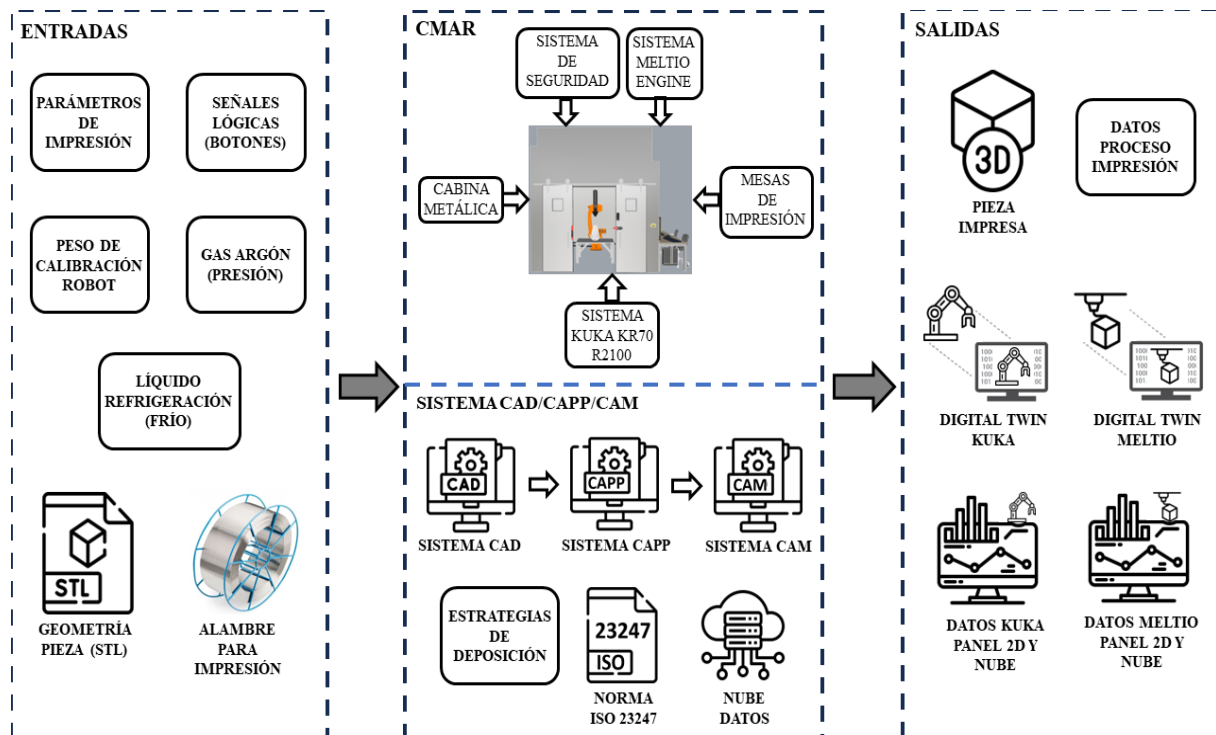


Figura 1: Arquitectura para Desarrollo de una CMAR basada en el proceso LMD

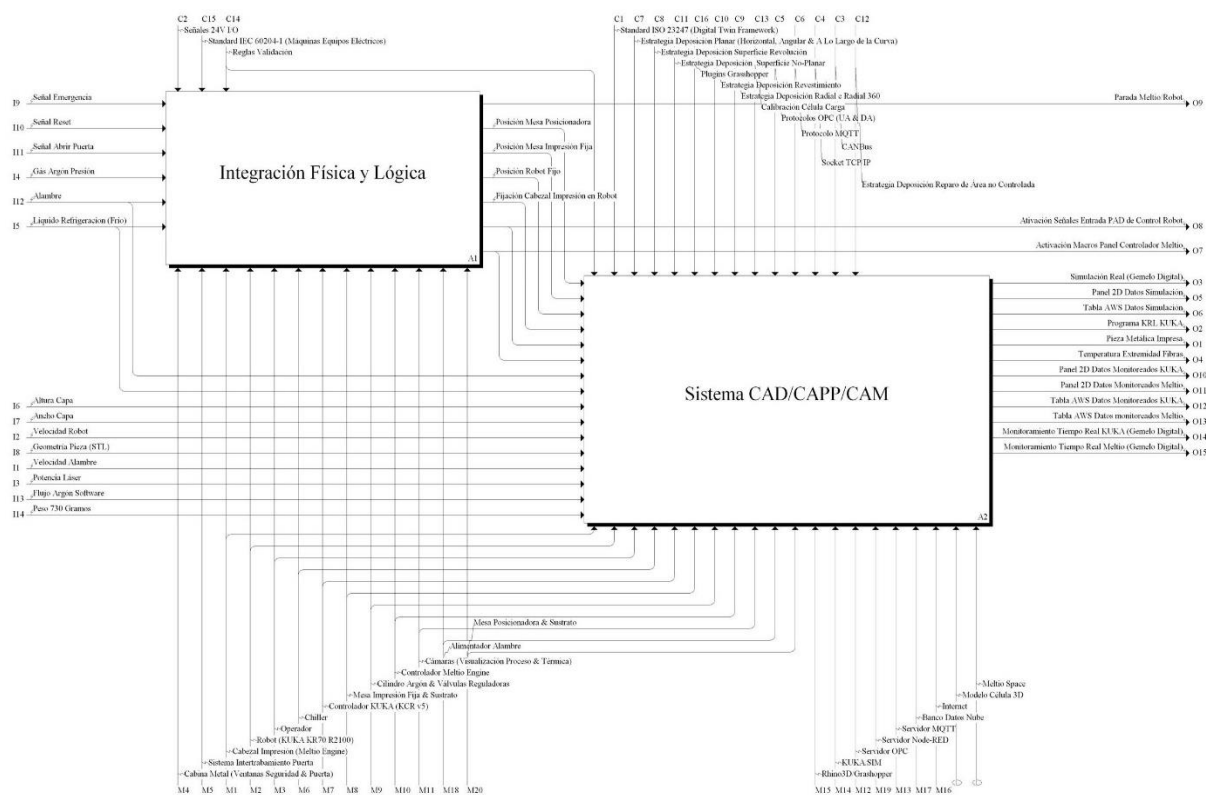


Figura 2: Diagrama IDEF0 Célula de Manufactura Aditiva Robótica

La figura 1 ilustra la arquitectura de la metodología propuesta para una Célula de Manufactura Aditiva Robótica basada en el Sistema de Deposición de Metal por Láser (LMD), la cual se divide en tres diferentes etapas que interactúan entre ellas:

1. **Entradas:** Parámetros y señales iniciales del sistema.
2. **Proceso:** Compuesta por la CMAR (Célula de Manufactura Aditiva Robótica) y el Sistema CAD/CAPP/CAM, abarcando el diseño, la planificación y la manufactura del proceso de impresión.
3. **Salidas:** Resultados y productos del sistema.

La etapa de entradas del proceso está compuesta por los parámetros del proceso de impresión, señales lógicas provenientes de los botones de la célula, el peso utilizado para la calibración del robot, la presión del gas argón, el líquido de refrigeración frío, la geometría de la pieza en archivo STL y el material de alambre para impresión.

La etapa de proceso está constituida por la célula de manufactura aditiva CMAR y el sistema CAD/CAPP/CAM. Estos dos elementos operan de manera conjunta y coordinada, permitiendo una integración fluida entre el diseño, la planificación y la manufactura del proceso de impresión asistida por computadora. Durante la impresión de la pieza, la CMAR y el sistema CAD/CAPP/CAM interactúan continuamente, ajustando parámetros y optimizando cada fase para asegurar la precisión y calidad del producto final.

La célula de manufactura aditiva robótica (CMAR) está compuesta por una cabina metálica, un sistema de seguridad para el operador, mesas de impresión, el sistema KUKA KR70 R2100 y el sistema MELTIO ENGINE. Esta CMAR está integrada tanto física como lógicamente para facilitar la interacción de los elementos físicos presentes en el proceso de impresión.

El sistema CAD/CAPP/CAM se compone del sistema CAD para el diseño de la pieza, el sistema CAPP para la planificación del proceso de impresión y el sistema CAM para la manufactura de la pieza. Basado en un gemelo digital conforme a la norma ISO 23247, este sistema interactúa enviando datos del proceso a un banco de datos en la nube, lo que permite una supervisión y ajuste precisos durante el proceso de manufactura.

La etapa de salidas del proceso abarca los datos generados durante la impresión, así como los gemelos

digitales (DT) del robot KUKA y del sistema MELTIO ENGINE. También incluye los datos almacenados en la nube relacionados con ambos sistemas, el Panel 2D y la pieza metálica impresa, que constituyen los resultados finales del proceso de manufactura.

La figura 2 ilustra la estructura estratificada del sistema en dos niveles asociados a la Integración de la Célula de Manufactura Aditiva Robótica. Estos niveles comprenden una serie de actividades clave que aseguran el funcionamiento integral del sistema:

- **Integración física y lógica:** Este proceso implica la meticulosa interconexión física y lógica de todos los componentes que conforman la célula de manufactura aditiva. Asegura que cada parte del sistema, desde los dispositivos físicos hasta los elementos de control y datos, esté integrada de manera sinérgica y eficaz, facilitando así un funcionamiento coordinado y optimizado de todo el proceso de fabricación aditiva.
- **Sistema CAD/CAPP/CAM:** Este sistema está desarrollado para el diseño, planificación del proceso y manufactura dentro del contexto específico de la célula de manufactura aditiva. Está diseñado para gestionar y optimizar todas las etapas desde el diseño inicial hasta la fabricación final, integrándose estrechamente con los componentes físicos de la célula.

La actividad de Integración Física e Lógica implica la recepción de señales e insumos como entrada. Esta actividad coordina la interacción física entre los componentes de la célula de manufactura aditiva y genera como salidas la activación del sistema de seguridad, posición del robot y la mesa de impresión que son utilizadas como entrada para el sistema CAD/CAPP/CAM. Así, asegura la ejecución precisa de las tareas y optimiza la respuesta ante eventualidades operativas.

Por otro lado, la actividad del Sistema CAD/CAPP/CAM recibe como entrada los parámetros de impresión, la geometría específica de la pieza a imprimir y otros datos esenciales para el desarrollo del proceso. Las salidas de este sistema incluyen una simulación detallada del proceso de impresión, la generación del código de impresión para la máquina, la fabricación física de la pieza metálica deseada y el monitoreo continuo de variables críticas y datos de rendimiento. Este enfoque integral garantiza la consistencia en la calidad del producto final y optimiza la eficiencia operativa en todas las etapas del ciclo de producción.

2.1 Integración física e Integración Lógica

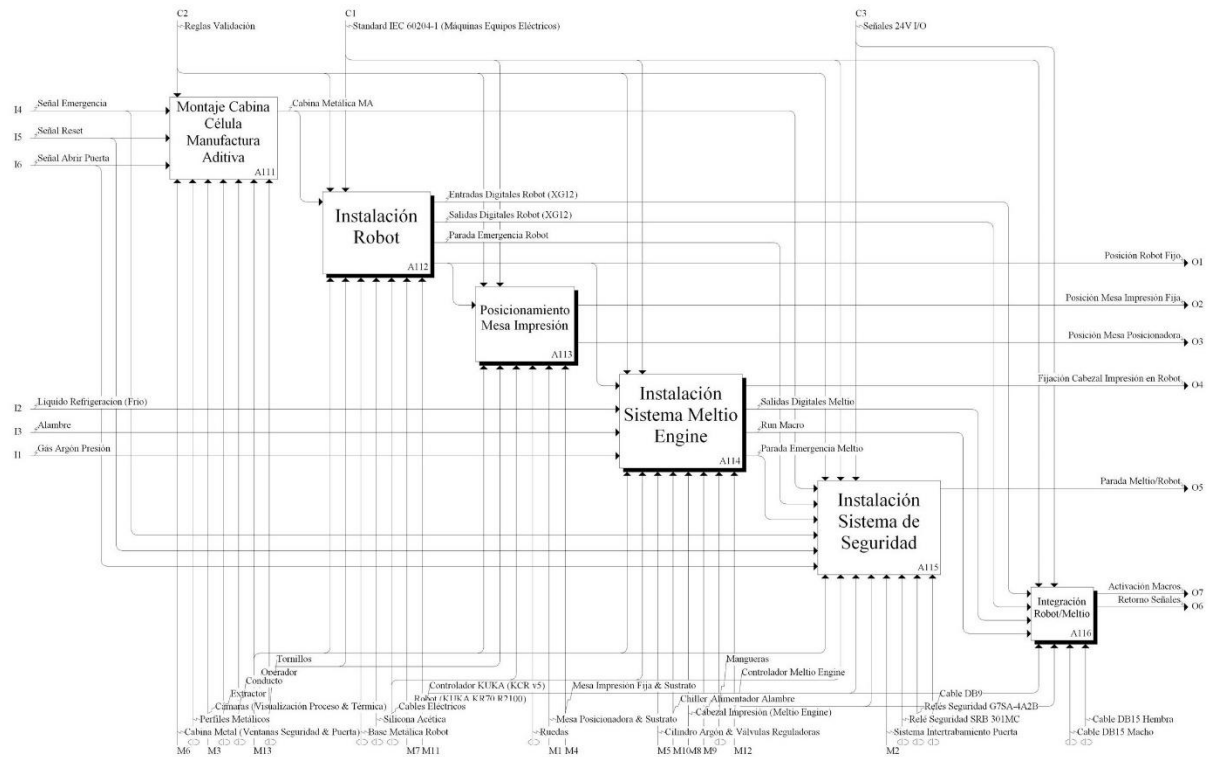


Figura 3: Diagrama IDEF0 Actividades Integración Física

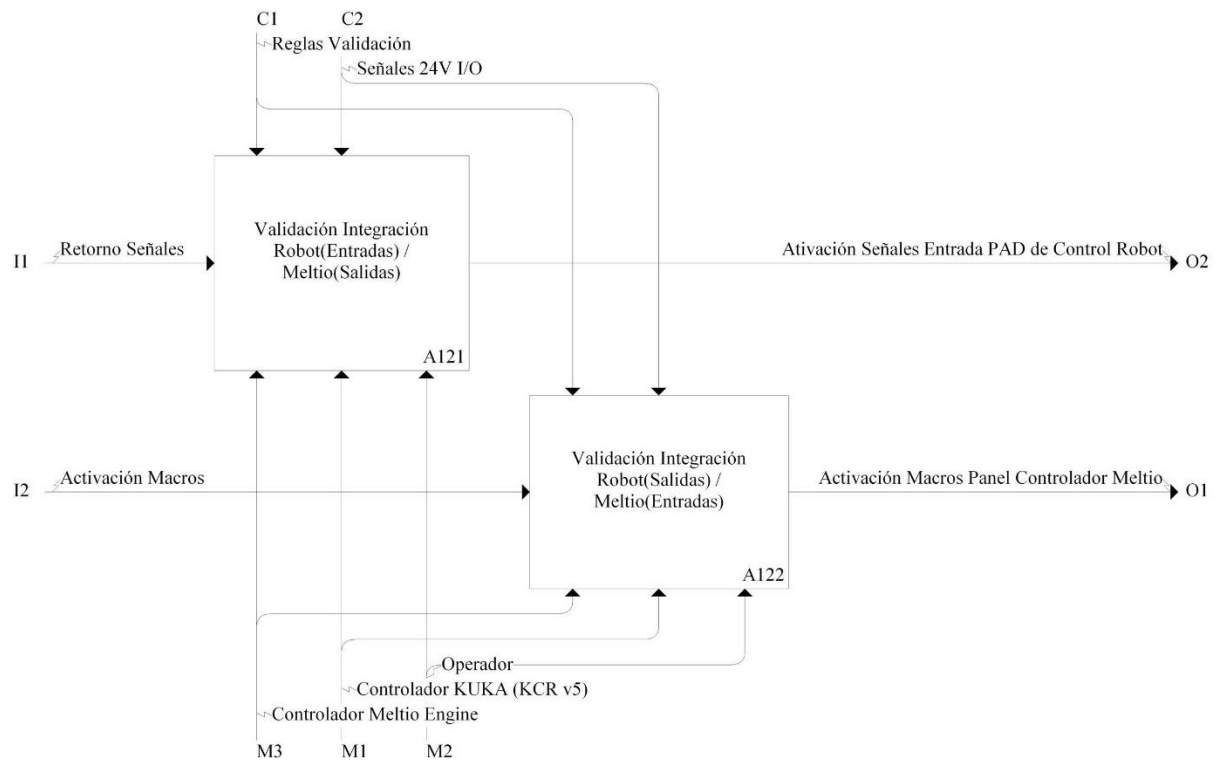


Figura 4: Diagrama IDEF0 Actividades Integración Lógica

A. Integración Física

La Figura 3 muestra el modelo IDEF0 relacionado con la actividad de Integración Física. Este modelo está compuesto por 6 actividades que facilitan la conexión física, eléctrica y mecánica de los componentes para la integración física de la célula de manufactura aditiva.

1. **Montaje de la cabina de la Célula de Manufactura Aditiva:** compuesta por una estructura metálica diseñada para garantizar la seguridad durante la operación de impresión.
2. **Instalación del robot:** incluye la fijación del robot en el área de trabajo y el montaje del controlador para asegurar su funcionamiento óptimo.
3. **Posicionamiento de las mesas de impresión:** implica ubicar estratégicamente la mesa fija y la mesa posicionadora dentro del área de impresión para maximizar la eficiencia del proceso.
4. **Instalación del Sistema Meltio Engine:** comprende la instalación del sistema de enfriamiento, gas, cabezal de impresión, alimentador de alambre, conexiones eléctricas de la PCB y la integración física del sistema Meltio.
5. **Instalación del Sistema de Seguridad:** implementa un sistema de intertrabamiento de puerta para mejorar la seguridad del operador durante la operación de la célula de manufactura.
6. **Integración Robo/Meltio:** consiste en la integración física entre el robot y el sistema Meltio Engine para asegurar un funcionamiento coordinado y eficiente del sistema de fabricación aditiva.

Estas actividades están estrechamente interconectadas dentro del sistema físico de la célula de manufactura aditiva robótica y reciben tanto entradas externas como combinaciones de entradas externas y salidas de otras actividades. Cada una de estas actividades está diseñada con múltiples mecanismos que garantizan su integración fluida dentro del sistema, asegurando así su funcionamiento coordinado y eficiente.

Los controles de estas actividades se basan en estrictas reglas de validación, normativas eléctricas y

el manejo de señales de entrada/salida de 24V. Las salidas resultantes no solo cumplen con las necesidades operativas específicas de la célula de manufactura aditiva robótica, sino que también actúan como entradas esenciales para otras actividades del sistema, promoviendo un funcionamiento integrado y armonioso con la integración lógica general del sistema.

B. Integración lógica

La Figura 4 presenta el modelo IDEF0 correspondiente a la actividad de Integración Lógica, la cual consta de dos componentes que facilitan la integración lógica con los elementos físicos de la célula de manufactura aditiva.

1. **Validación Integración Robot (Entradas)/ Meltio (Salidas):** Proceso que verifica y asegura que las señales de entrada provenientes de la integración física entre el robot y el sistema Meltio se procesen correctamente, generando señales de salida adecuadas para el sistema Meltio.
2. **Validación Integración Robot (Salidas)/ Meltio (Entradas):** Proceso que verifica y asegura que las señales de salida del robot, luego de la integración física, sean adecuadamente recibidas e interpretadas como señales de entrada por el sistema Meltio.

La actividad de Validación Integración Robot(Entradas)/Meltio(Salidas) tiene como entrada el retorno de señales de la integración física, utilizando el controlador del robot y el controlador Meltio Engine, y tiene como salida la activación de señales de entrada en el panel de control del robot.

La actividad de Validación Integración Robot(Salidas)/Meltio(Entradas) tiene como entrada la activación de macros de la integración física, utilizando el controlador del robot y el controlador Meltio Engine, y tiene como salida la activación de macros en el panel de la controladora Meltio.

La integración lógica desempeña un papel crucial al establecer una conexión fluida y coordinada entre los procesos de control y los componentes físicos. Esto permite que los controladores envíen instrucciones detalladas y precisas a los elementos físicos, facilitando la ejecución efectiva y eficiente de diversas tareas operativas dentro del sistema.

2.3 Sistema CAD/CAPP/CAM

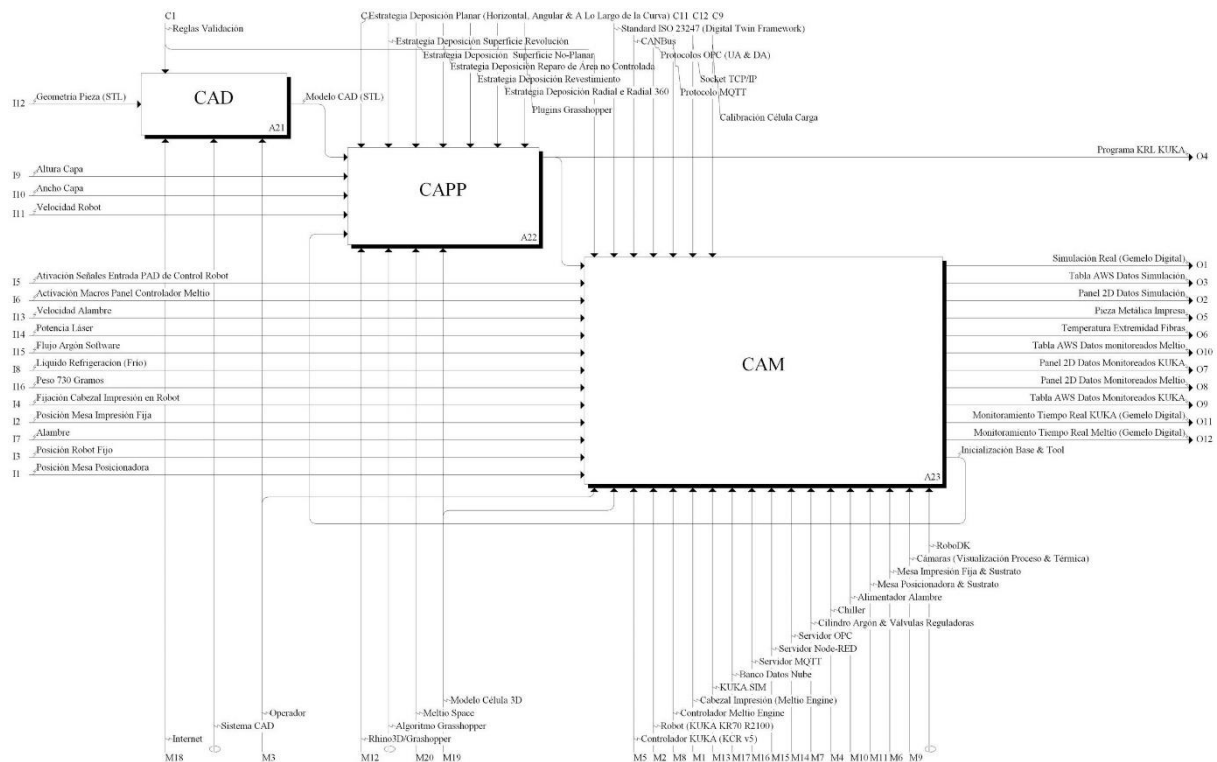


Figura 5: Diagrama IDEF0 Actividades Sistema CAD/CAPP/CAM

La figura 5 muestra el modelo IDEF0 referente a la actividad de desarrollo del Sistema CAD/CAPP/CAM. Está compuesta por 3 actividades que facilitan el desarrollo de este sistema: CAD (Diseño Asistido Por Computadora), CAPP (Planeamiento Proceso Asistido Por Computadora) y CAM (Manufactura Asistida por Computadora).

A. CAD

La actividad CAD se divide en tres etapas: Importación del archivo STL, Generación del modelo base y Ajuste y refinamiento del modelo.

La importación del archivo STL prepara el modelo para el sistema CAD, que luego se procesa para crear un modelo base. Este modelo base se perfecciona mediante ajustes y refinamientos dentro del entorno CAD. Estas etapas utilizan recursos del sistema CAD y requieren intervención operativa para su ejecución.

B. CAPP

La actividad CAPP consta de tres subactividades: Importación del Modelo CAD, corte de la Pieza en capas y Generación del Programa KRL.

La actividad CAPP recibe como entrada un modelo CAD en formato STL proveniente de la salida de la actividad CAD, junto con ajustes de origen de la herramienta base de la salida de la actividad CAM y parámetros externos como la velocidad del robot, altura y ancho de la capa. Esta actividad planifica la impresión y produce como salida un código KRL KUKA para la ejecución del proceso de manufactura aditiva.

C. CAM

La actividad CAM se compone de dos subactividades: Gemelo Digital - Simulación (CAM Planeamiento) e Impresión 3D (CAM Ejecución).

Las 2 actividades utilizan el programa KRL KUKA generado en la actividad CAPP. CAM Planeamiento simula con un gemelo digital, mostrando una simulación real y monitoreo de variables en un panel 2D y tabla AWS. CAM Ejecución emplea parámetros de impresión, salidas de integración física y lógica, así como entradas externas. CAM Monitoreo incluye el monitoreo continuo del proceso de impresión utilizando un gemelo digital.

3. Resultados

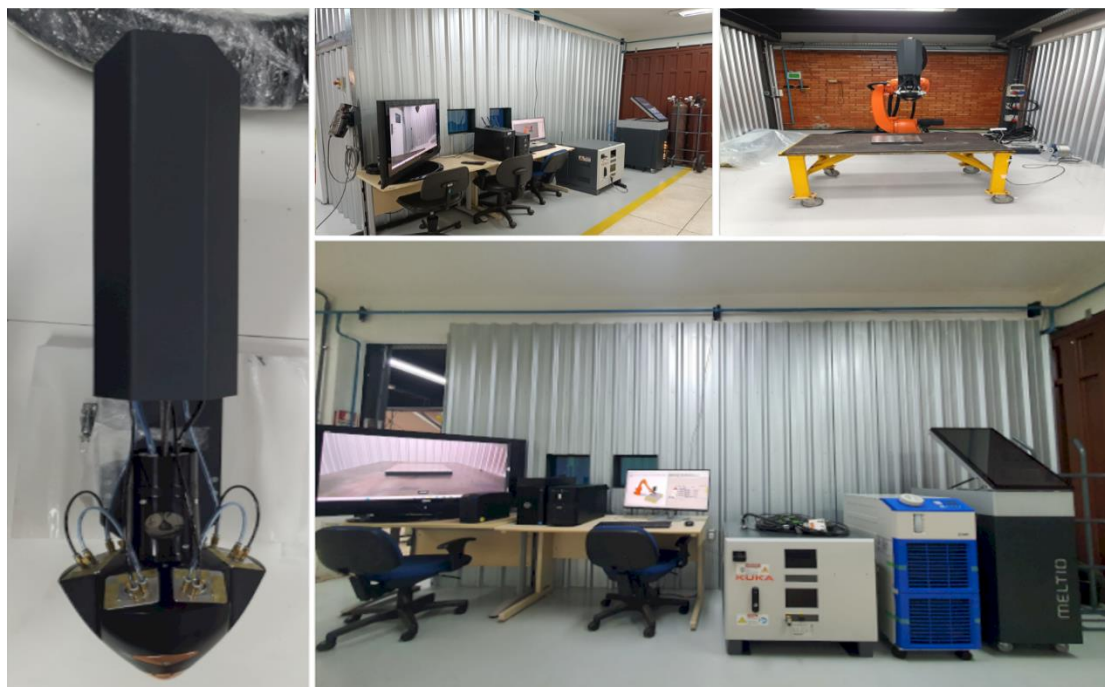


Figura 6: Célula Manufactura Aditiva Robótica LMD

En la figura 6 se presenta el cabezal de impresión, el sistema MELTIO ENGINE, el sistema KUKA KR70 R2100, la cabina metálica, el sistema de seguridad y los computadores destinados al monitoreo del proceso. La cabina metálica está equipada con un sistema de seguridad avanzado que incluye intertrabamiento de puertas y ventanas, así como un filtro láser de 980 nm para la protección del operador. Dentro de la cabina se encuentran el robot, la mesa de impresión y el cabezal MELTIO ENGINE, todos configurados para asegurar un proceso de impresión eficiente y seguro.

La célula de manufactura aditiva robótica (CMAR) proceso de deposición de metal por láser (LMD) fue desarrollada según la metodología propuesta. Esta CMAR está ubicada en el laboratorio GRACO de la Universidade de Brasília. La configuración de la célula refleja una integración meticulosa de los diversos componentes y sistemas especificados en la metodología, y su ubicación en el laboratorio propicia la realización de investigaciones y aplicaciones avanzadas en el ámbito de la manufactura aditiva.

La URL (<https://youtu.be/tVQH4ARsGFU?si=grPeRUZSnky-e7nu>) proporciona un video que ilustra el proceso de impresión de piezas metálicas utilizando la Célula de Manufactura Aditiva Robótica basada en el Sistema de Deposición de Metal por Láser (LMD) [17].

Además, el sistema CAD/CAPP/CAM, basado en un gemelo digital (DT), se integra en el proceso de impresión para el diseño, la planificación y la manufactura aditiva de la pieza metálica.

La URL (<https://youtu.be/80m1G-9dw7k?si=eoFhVeDMrsIXS0xh>) ofrece un video que presenta un DT del proceso de impresión de piezas metálicas, utilizando la Célula de Manufactura Aditiva Robótica donde se realiza la simulación en kuka.sim para validación del código de impresión, se presentan los datos en un panel 2D en Node-Red y se almacenan en la nube de AWS [18].

4. Casos de Estudio

Tabla 1. Parámetros de Impresión de la Pieza 1.

Pieza 1	
Potencia Laser: 800 W	Ancho Capa: 1 mm
Velocidad Alambre: 15.30 mm/s	Altura Capa: 1.2 mm
Velocidad Impresión: 10 mm/s	Altura Pieza: 21.90 mm
Diámetro Alambre: 1 mm	Acho Pieza: 19.82 mm
Flujo gas: 12000 ml/min	Longitud Pieza: 19.85 mm
Material: 316 LSi	Software: Grasshopper
Temperatura: 216.5 °C	



Figura 7: Pieza Impresa Caso de Estudio 1

En la tabla 1 se detallan los parámetros de impresión, las dimensiones de la pieza, la temperatura del proceso, el material utilizado y el software empleado en la impresión de la pieza del caso de estudio 1, como se muestra en la figura 7. El software Grasshopper/Rhino3D se utilizó para recibir el archivo STL de la geometría de la pieza, desarrollar la estrategia de deposición y generar el código KRL necesario para las instrucciones del robot durante el proceso de impresión de la pieza final.

Tabla 2. Parámetros de Impresión de la Pieza 2.

Pieza 2	
Potencia Laser: 845 W	Ancho Capa: 1 mm
Velocidad Alambre: 15.28 mm/s	Altura Capa: 1.2 mm
Velocidad Impresión: 10 mm/s	Altura Pieza: 20.70 mm
Diámetro Alambre: 1 mm	Acho Pieza: 20.50 mm
Flujo gas: 10000 ml/min	Longitud Pieza: 20.10 mm
Material: 316 LSi	Software: Meltio Space
Temperatura: 216.5 °C	



Figura 8: Pieza Impresa Caso de Estudio 2

En la tabla 2 se detallan los parámetros de impresión, las dimensiones de la pieza, la temperatura del proceso, el material utilizado y el software empleado en la impresión de la pieza del caso de estudio 2, como se muestra en la figura 8. El software Meltio Space se utilizó para recibir el archivo STL de la geometría de la pieza, desarrollar la estrategia de deposición y generar el código KRL necesario para las instrucciones del robot durante el proceso de impresión de la pieza final.

5. Conclusiones

La metodología propuesta en este estudio para desarrollar una célula de manufactura aditiva robótica utilizando LMD-wire demostró ser efectiva en la fabricación de piezas metálicas complejas y de gran escala.

Los resultados de este estudio facilitan la implementación de células de manufactura aditiva robótica en industrias que requieren alta precisión, larga escala y personalización de piezas.

La integración de un gemelo digital con el sistema CAD/CAPP/CAM Permite la conexión efectiva entre el mundo físico y digital, mejorando la precisión y eficiencia en la fabricación de piezas metálicas representando un avance en la automatización de los procesos de manufactura aditiva además de ofrecer un marco estándar para futuros sistemas de manufactura aditiva, promoviendo la eficiencia y la interoperabilidad.

La aplicación de diversos softwares y la optimización de los parámetros de deposición resultaron en mejoras significativas en las mediciones dimensionales del segundo caso de estudio. Estos ajustes condujeron a una mayor precisión y consistencia en la manufactura, destacando la importancia de la selección adecuada de herramientas y parámetros en el proceso de impresión.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud al CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) y a la FAPDF (Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal) por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo, así mismo a la Universidade de Brasília y al Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos del Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia.

7. Referencias

- [1] G. Liu, X. Zhang, X. Chen, Y. He, L. Cheng, M. Huo, J. Yin, F. Hao, S. Chen, P. Wang et al., “Additive manufacturing of structural materials,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 145, p. 100596, 2021.
- [2] D. Gu, X. Shi, R. Poprawe, D. L. Bourell, R. Setchi, and J. Zhu, “Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing,” *Science*, vol. 372, no. 6545, p. eabg1487, 2021.
- [3] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, and M. Guagliano, “Surface posttreatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities,” *Additive Manufacturing*, vol. 37, p. 101619, 2021.
- [4] B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto, and A. du Plessis, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021.
- [5] P. M. Bhatt, A. M. Kabir, M. Peralta, H. A. Bruck, and S. K. Gupta, “A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 27, pp. 278–289, 2019.
- [6] P. Álvarez, F. Cordovilla, M.A. Montealegre, M. Díaz, S. Chacón-Fernandez, A. García-Beltrán, I. Angulo and J.L. Ocaña, “Model-Based input energy control for reproducible AISI 316L laser deposited tracks,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 236, 2024.
- [7] A. J. Alvares, I. Lacroix, M.A. de L. Maron, and B. S. Figueroa, “Desenvolvimento de uma célula de manufatura aditiva robotizada baseada no processo deposição de metal à laser usando arame de soldagem”, *PRW*, vol. 5, nº 21, p. 17–39, 2023.
- [8] L. Yan, Y. Chen, and F. Liou, “Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition”, *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100901, 2020.
- [9] A. Alvares, I. Lacroix, M. Maron, and B. Figueroa, “Robotic additive manufacturing by laser metal deposition in the context of industry 4.0”, *CLIUM*, vol. 23, nº 23, p. 79–103, 2023.
- [10] A. Phua, C. Davies, and G. Delaney, “A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing,” *Computers in Industry*, vol. 140, p. 103667, 2022.
- [11] P. Stavropoulos, A. Papacharalampopoulos, C. K. Michail, and G. Chrysosolouris, “Robust additive manufacturing performance through a control oriented digital twin,” *Metals*, vol. 11, no. 5, p. 708, 2021.
- [12] ISO 23247-1, “Automation systems and integration — digital twin framework for manufacturing — part 1: Overview and general principles”, 2021.
- [13] E. Glaessgen and D. Stargel, “The digital twin paradigm for future of NASA and U.S. air force vehicles”, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, doi:10.2514/6.2012-1818, 2012.
- [14] B. S. Figueroa, L. Araújo and A. Alvares, “Development of a Digital Twin for a Laser Metal Deposition (LMD) Additive Manufacturing Cell”, *Advances in Automation and Robotics Research*, p. 68-76, 2024.
- [15] J. Cabral, E. Gasca and A. Alvares, “Digital Twin Implementation for Machining Center Based on ISO 23247 Standard”, *IEEE Latin America Transaction*, doi:// 10.1109/TLA.2023.10130834, 2023.
- [16] A. Alvares, C. Zhu, L. Silva, T. Tankova, I. Lacroix and B. S. Figueroa, “Development of a Robotic Additive Manufacturing Cell Based on Laser Metal Deposition Process at the University of Coimbra and University of Brasilia”, 27th International Congress of Mechanical Engineering, doi://10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-0718, 2023.
- [17] A. Alvares, “Cubo20mm-845Watts-NovoControlador-Meltio”, <https://youtu.be/tVQH4ARsGFU?si=grPeRUZSnky-e7nu>, 2024.
- [18] Brayan S. Figueroa, “Digital Twin LMD Additive Manufacturing Cell”, <https://youtu.be/80m1G-9dw7k?si=eoFhVeDMrsIXS0xh>, 2023.